

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R P.835-6 建议书
(12/2017)

参考标准大气

P 系列
无线电波传播



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

知识产权政策（IPR）

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议的附件1中所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

ITU-R 系列建议书

（也可在线查询 <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>）

系列	标题
BO	卫星传送
BR	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和频率标准发射
V	词汇和相关问题

说明： 该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版
2018年，日内瓦

© 国际电联 2018

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R P.835-6 建议书*

参考标准大气

(ITU-R第201/3号研究课题)

(1992-1994-1997-1999-2005-2012-2017年)

范围

ITU-R P.835建议书提供计算地对空路径上气体衰减所需的参考标准大气的表达式和数据。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

a) 在计算地一空路径上的气体衰减过程中，必须要使用参考标准大气，

建议

1 应该用附件1中的标准大气来确定温度、压力和水蒸气压力与高度的关系，用于无法获得更可靠的本地数据时计算气体衰减；

2 当要知道关心的地点的季度和月度的变化时，应该使用附件2和附件3中的实验数据。

附件 1

1 全球年平均参考大气

下面的全球年平均参考大气反映了全球年平均温度和压力相对于高度的分布情况。

1.1 温度和压力

全球年平均参考大气与1976年美国标准大气近似，相对误差不大。大气温度和压力分布的定义采用了两种高度¹体制：1) 从0 km'至84.852 km'的位势高度，以及2) 从86 km到100 km的几何高度。位势高度 h' （公里）和几何高度 h （公里）之间的转换关系为：

$$h' = \frac{6356.766h}{6356.766+h} \quad (1a)$$

以及

* 无线电通信第3研究组于2020年根据ITU-R第1号决议对此建议书进行了编辑性修正。

¹ km'是位势高度的单位，km是几何高度的单位。

$$h = \frac{6356.766h'}{6356.766-h'} \quad (1b)$$

其中84.852 km'的位势高度与86 km的几何高度对应。由于P系列各建议书（如，ITU-R P.676建议书附件1）采用几何高度，几何高度 $h \leq 86$ km处的温度和压力可通过将几何高度 h 转换为相应的位势高度 h' 并计算相应位势高度 h' 处的温度和压力进行计算。

在第一种高度体制下，位势高度 h' （km'）处的温度 T （K）为：

$$T(h') = 288.15 - 6.5 h' \quad \text{对于 } 0 \leq h' \leq 11 \quad (2a)$$

$$T(h') = 216.65 \quad \text{对于 } 11 < h' \leq 20 \quad (2b)$$

$$T(h') = 216.65 + (h'-20) \quad \text{对于 } 20 < h' \leq 32 \quad (2c)$$

$$T(h') = 228.65 + 2.8 (h'-32) \quad \text{对于 } 32 < h' \leq 47 \quad (2d)$$

$$T(h') = 270.65 \quad \text{对于 } 47 < h' \leq 51 \quad (2e)$$

$$T(h') = 270.65 - 2.8 (h'-51) \quad \text{对于 } 51 < h' \leq 71 \quad (2f)$$

$$T(h') = 214.65 - 2.0 (h'-71) \quad \text{对于 } 71 < h' \leq 84.852 \quad (2g)$$

位势高度 h' （km'）处的压力 P （hPa）为：

$$P(h') = 1013.25 \left[\frac{288.15}{288.15 - 6.5 h'} \right]^{-34.1632/6.5} \quad \text{对于 } 0 \leq h' \leq 11 \quad (3a)$$

$$P(h') = 226.3226 \exp[-34.1632 (h' - 11)/216.65] \quad \text{对于 } 11 < h' \leq 20 \quad (3b)$$

$$P(h') = 54.74980 \left[\frac{216.65}{216.65 + (h'-20)} \right]^{34.1632} \quad \text{对于 } 20 < h' \leq 32 \quad (3c)$$

$$P(h') = 8.680422 \left[\frac{228.65}{228.65 + 2.8 (h'-32)} \right]^{34.1632/2.8} \quad \text{对于 } 32 < h' \leq 47 \quad (3d)$$

$$P(h') = 1.109106 \exp[-34.1632 (h' - 47)/270.65] \quad \text{对于 } 47 < h' \leq 51 \quad (3e)$$

$$P(h') = 0.6694167 \left[\frac{270.65}{270.65 - 2.8 (h'-51)} \right]^{-34.1632/2.8} \quad \text{对于 } 51 < h' \leq 71 \quad (3f)$$

$$P(h') = 0.03956649 \left[\frac{214.65}{214.65 - 2.0 (h'-71)} \right]^{-34.1632/2.0} \quad \text{对于 } 71 < h' \leq 84.852 \quad (3g)$$

在第二种高度体制下，几何高度 h （km）处的温度 T （K）为：

$$T(h) = 186.8673 \quad \text{对于 } 86 \leq h \leq 91 \quad (4a)$$

$$T(h) = 263.1905 - 76.3232 \left[1 - \left(\frac{h-91}{19.9429} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{对于 } 91 < h \leq 100 \quad (4b)$$

几何高度 h （km）处的压力 P （hPa）为：

$$P(h) = \exp (a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4) \quad \text{对于 } 86 \leq h \leq 100 \quad (5)$$

其中

$$a_0 = 95.571899$$

$$a_1 = -4.011801$$

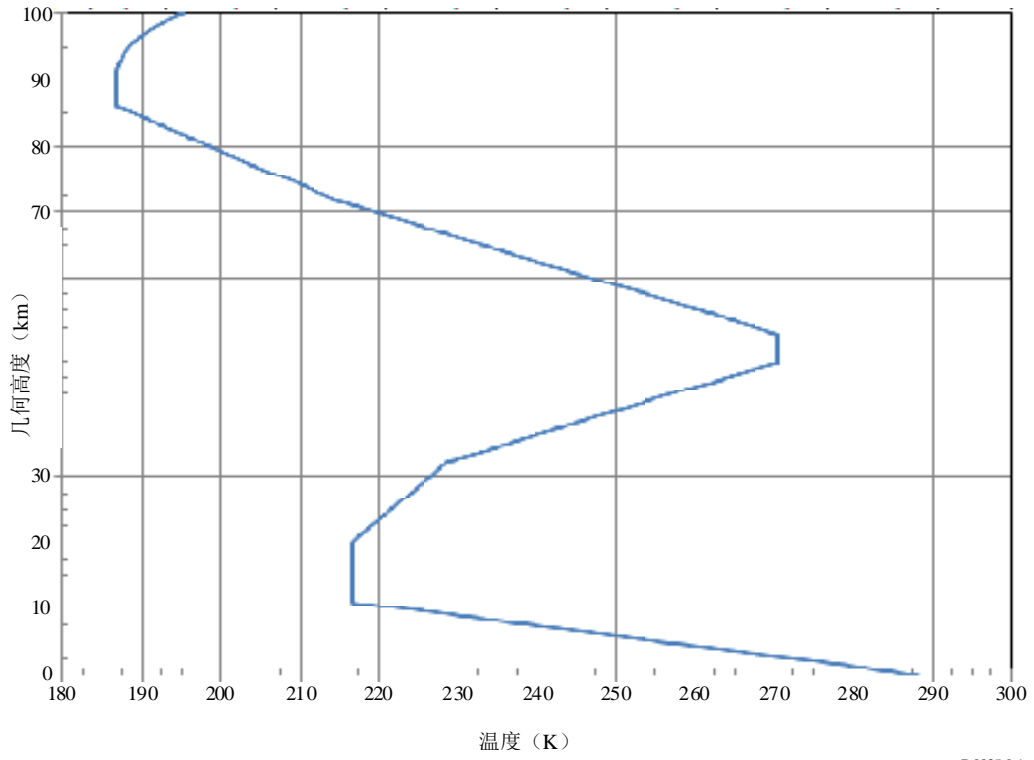
$$a_2 = 6.424731 \times 10^{-2}$$

$$a_3 = -4.789660 \times 10^{-4}$$

$$a_4 = 1.340543 \times 10^{-6}$$

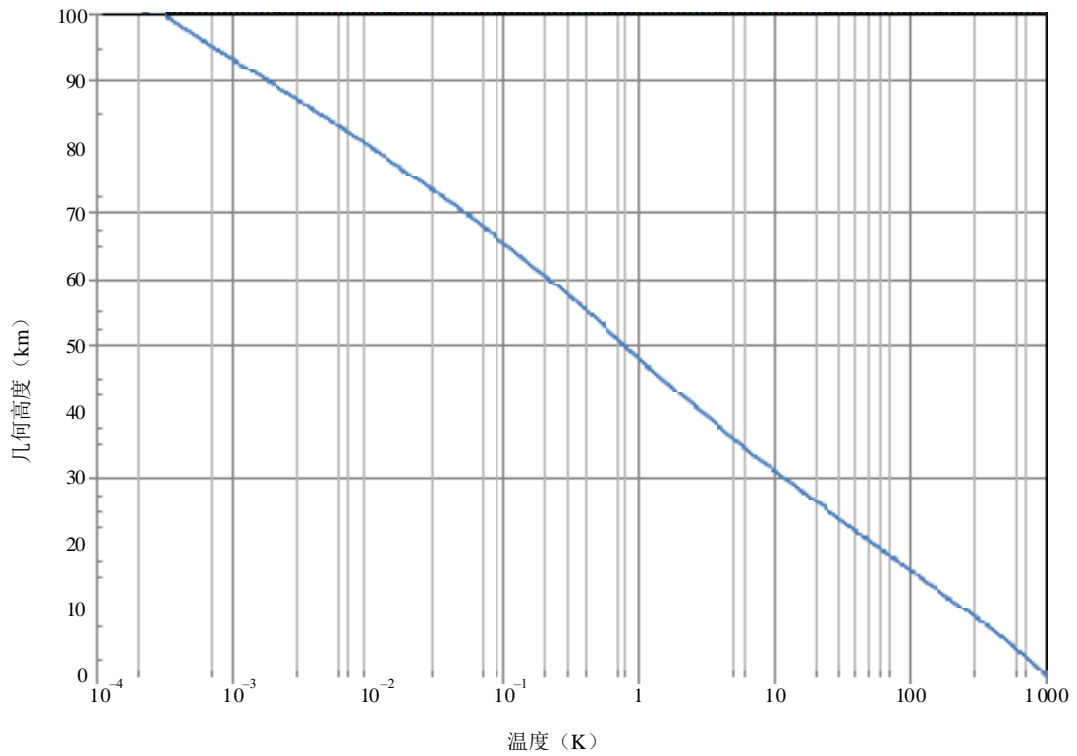
温度和压力相对于几何高度的分布分别如图1和图2所示，以供参考。

图1
温度相对于几何高度的分布



P.0835-0 1

图2
压力相对于几何高度的分布



P.0835-02

1.2 水蒸气压力

通常，大气中水蒸气的分布变化很大，但是可以由下式近似获得：

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-h/h_0) \quad \text{g/m}^3 \quad (6)$$

其中标高 $h_0 = 2 \text{ km}$ ，而标准地平面水蒸气密度为：

$$\rho_0 = 7.5 \quad \text{g/m}^3 \quad (7)$$

用下列公式（见ITU-R P.453建议书）可以根据密度求出水蒸气压力：

$$e(h) = \frac{\rho(h) T(h)}{216.7} \quad \text{hPa} \quad (8)$$

在混合比 $e(h)/P(h) = 2 \times 10^{-6}$ 的高度以下，水蒸气密度随高度增加而呈指数减小。在这一高度以上，假定混合比为常数。

1.3 用于衰减计算的干燥大气

除水蒸气以外的大气中的各气体（“干大气”）的密度分布可以根据§ 1.1中给出的温度和压力分布来求出。

为了计算衰减，这一密度分布可根据公式(6)用指数分布来近似，公式中代入：

$$h_0 = 6 \text{ km} \quad (9)$$

2 低纬度地区年参考大气

对于低纬度地区（小于 22° ），季节性变化不是很重要的，可以利用一个年度分布曲线。

在高度 h (km) 处的温度 T (K) 由下面的公式给出：

$T(h) = 300.4222 - 6.3533 h + 0.005886 h^2$	对于 $0 \leq h < 17$
$T(h) = 194 + (h - 17) 2.533$	对于 $17 \leq h < 47$
$T(h) = 270$	对于 $47 \leq h < 52$
$T(h) = 270 - (h - 52) 3.0714$	对于 $52 \leq h < 80$
$T(h) = 184$	对于 $80 \leq h \leq 100$

而压力 P (hPa) 为：

$P(h) = 1012.0306 - 109.0338 h + 3.6316 h^2$	对于 $0 \leq h \leq 10$
$P(h) = P_{10} \exp[-0.147 (h - 10)]$	对于 $10 < h \leq 72$
$P(h) = P_{72} \exp[-0.165 (h - 72)]$	对于 $72 < h \leq 100$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为10 km和72 km处的压力。

对水蒸气 (g/m^3):

$\rho(h) = 19.6542 \exp[-0.2313 h - 0.1122 h^2 + 0.01351 h^3 - 0.0005923 h^4]$	对于 $0 \leq h \leq 15$
$\rho(h) = 0$	对于 $h > 15$

3 中纬度地区参考大气

对中纬度（在22° 和45° 之间）地区，夏季和冬季可以用下列分布。

3.1 夏季中纬度

在高度 h (km) 处的温度 T (K) 由下面的公式给出：

$$\begin{aligned} T(h) &= 294.9838 - 5.2159 h - 0.07109 h^2 && \text{对于 } 0 \leq h < 13 \\ T(h) &= 215.15 && \text{对于 } 13 \leq h < 17 \\ T(h) &= 215.15 \exp [(h - 17) 0.008128] && \text{对于 } 17 \leq h < 47 \\ T(h) &= 275 && \text{对于 } 47 \leq h < 53 \\ T(h) &= 275 + \{1 - \exp [(h - 53) 0.06]\} 20 && \text{对于 } 53 \leq h < 80 \\ T(h) &= 175 && \text{对于 } 80 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

而压力 P (hPa) 为：

$$\begin{aligned} P(h) &= 1012.8186 - 111.5569 h + 3.8646 h^2 && \text{对于 } 0 \leq h \leq 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0.147 (h - 10)] && \text{对于 } 10 < h \leq 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0.165 (h - 72)] && \text{对于 } 72 < h \leq 100 \end{aligned}$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为10 km和72 km处的压力。

对水蒸气 (g/m^3):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 14.3542 \exp [-0.4174 h - 0.02290 h^2 \\ &\quad + 0.001007 h^3] && \text{对于 } 0 \leq h \leq 15 \\ \rho(h) &= 0 && \text{对于 } h > 15 \end{aligned}$$

3.2 冬季中纬度

在高度 h (km) 处的温度 T (K) 由下面的公式给出：

$$\begin{aligned} T(h) &= 272.7241 - 3.6217 h - 0.1759 h^2 && \text{对于 } 0 \leq h < 10 \\ T(h) &= 218 && \text{对于 } 10 \leq h < 33 \\ T(h) &= 218 + (h - 33) 3.3571 && \text{对于 } 33 \leq h < 47 \\ T(h) &= 265 && \text{对于 } 47 \leq h < 53 \\ T(h) &= 265 - (h - 53) 2.0370 && \text{对于 } 53 \leq h < 80 \\ T(h) &= 210 && \text{对于 } 80 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

而压力 P (hPa) 为：

$$\begin{aligned} P(h) &= 1018.8627 - 124.2954 h + 4.8307 h^2 && \text{对于 } 0 \leq h \leq 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0.147 (h - 10)] && \text{对于 } 10 < h \leq 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0.155 (h - 72)] && \text{对于 } 72 < h \leq 100 \end{aligned}$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为10 km和72 km处的压力。

对水蒸气 (g/m^3):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 3.4742 \exp [-0.2697 h - 0.03604 h^2 \\ &\quad + 0.0004489 h^3] && \text{对于 } 0 \leq h \leq 10 \\ \rho(h) &= 0 && \text{对于 } h > 10 \end{aligned}$$

4 高纬度地区参考大气

对高纬度（高于 45° ）地区，夏季和冬季可以用下列分布。

4.1 夏季高纬度

在高度 h (km) 处的温度 T (K) 由下面的公式给出：

$$\begin{aligned} T(h) &= 286.8374 - 4.7805 h - 0.1402 h^2 && \text{对于 } 0 \leq h < 10 \\ T(h) &= 225 && \text{对于 } 10 \leq h < 23 \\ T(h) &= 225 \exp [(h - 23) 0.008317] && \text{对于 } 23 \leq h < 48 \\ T(h) &= 277 && \text{对于 } 48 \leq h < 53 \\ T(h) &= 277 - (h - 53) 4.0769 && \text{对于 } 53 \leq h < 79 \\ T(h) &= 171 && \text{对于 } 79 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

而压力 P (hPa) 为：

$$\begin{aligned} P(h) &= 1008.0278 - 113.2494 h + 3.9408 h^2 && \text{对于 } 0 \leq h \leq 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0.140 (h - 10)] && \text{对于 } 10 < h \leq 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0.165 (h - 72)] && \text{对于 } 72 < h \leq 100 \end{aligned}$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为10 km和72 km处的压力。

对水蒸气 (g/m^3):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 8.988 \exp [-0.3614 h - 0.005402 h^2 \\ &\quad - 0.001955 h^3] && \text{对于 } 0 \leq h \leq 15 \\ \rho(h) &= 0 && \text{对于 } h > 15 \end{aligned}$$

4.2 冬季高纬度

在高度 h (km) 处的温度 T (K) 由下面的公式给出：

$$\begin{aligned} T(h) &= 257.4345 + 2.3474 h - 1.5479 h^2 + 0.08473 h^3 && \text{对于 } 0 \leq h < 8.5 \\ T(h) &= 217.5 && \text{对于 } 8.5 \leq h < 30 \\ T(h) &= 217.5 + (h - 30) 2.125 && \text{对于 } 30 \leq h < 50 \\ T(h) &= 260 && \text{对于 } 50 \leq h < 54 \\ T(h) &= 260 - (h - 54) 1.667 && \text{对于 } 54 \leq h \leq 100 \end{aligned}$$

而压力 P (hPa):

$$\begin{aligned} P(h) &= 1010.8828 - 122.2411 h + 4.554 h^2 && \text{对于 } 0 \leq h \leq 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0.147 (h - 10)] && \text{对于 } 10 < h \leq 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0.150 (h - 72)] && \text{对于 } 72 < h \leq 100 \end{aligned}$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为10 km和72 km处的压力。

对水蒸气 (g/m^3):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 1.2319 \exp [0.07481 h - 0.0981 h^2 + 0.00281 h^3] && \text{对于 } 0 \leq h \leq 10 \\ \rho(h) &= 0 && \text{对于 } h > 10 \end{aligned}$$

附件 2

1 大气垂直分布的实验数据

在全世界353个地点，历经10年（1980-1989年）的无线电探空仪测试，得到了关于温度、压力和相对湿度的垂直剖面分布的月平均值。这一数据集（DST.STD）可以由国际电联/无线电通信局（ITU/BR）取得，它包含00.00 UTC和12.00 UTC两种情况下压力、温度和相对湿度的月平均垂直分布。这些分布是在不下雨的情况下计算出来的，高度范围从0到16 km，间隔500 m计算一个点。平均月度分布数据放在名为<WMO_code>.dat的ASC II文件中，其中WMO_code是按照世界气象组织（WMO）规定的站名代码（例如：03496.dat文件中的03496是WMO对Hemsby-in-Norfolk的站代码）。表2给出了一个垂直剖面分布的例子。地址列表放在名为dst_std_lst.csv的ASC II文件中（用逗号分开的数值文件，即CSV文件格式）。这一文件的每一记录包括下列字段：WMO_CODE、站名、国家、纬度、经度、海拔高度。这样的记录的一个例子如表3所示。

在最大高度以上，利用附件1给出的参考分布剖面，可进行外插法运算。为了将相对湿度转化为水蒸气密度的绝对值，应该使用ITU-R P.453建议书中的有关公式。

表2

DST.STD数据格式 – 月平均分布的实例
(站号 10410)

YYMMDDHH NL			
99 199 0 33			
压力 (hPa)	Z (km)	Temp (K)	RH (%/100)
1 016.905	0.00	273.62	0.864E+00
956.686	0.50	273.33	0.830E+00
898.555	1.00	271.74	0.754E+00
844.014	1.50	269.59	0.665E+00
791.860	2.00	267.15	0.591E+00
742.661	2.50	264.56	0.518E+00
696.285	3.00	261.89	0.470E+00
651.977	3.50	258.94	0.458E+00
610.086	4.00	255.88	0.448E+00
570.467	4.50	252.69	0.445E+00
533.076	5.00	249.33	0.451E+00
497.767	5.50	245.90	0.453E+00
464.123	6.00	242.32	0.450E+00
432.441	6.50	238.75	0.450E+00
402.414	7.00	235.16	0.443E+00
374.177	7.50	231.59	0.437E+00
347.236	8.00	228.12	0.433E+00
322.281	8.50	224.88	0.427E+00

表2 (完)

YYMMDDHH NL			
99 199 0 33			
298.474	9.00	221.89	0.421E+00
276.492	9.50	219.27	0.416E+00
255.527	10.00	217.08	0.411E+00
236.297	10.50	215.62	0.402E+00
218.415	11.00	214.79	0.393E+00
201.366	11.50	214.14	0.348E+00
186.214	12.00	214.02	0.205E+00
172.093	12.50	214.24	0.104E+00
158.709	13.00	214.66	0.368E-01
146.492	13.50	214.94	0.351E-02
135.813	14.00	214.88	0.120E-02
125.690	14.50	214.50	0.117E-02
116.027	15.00	214.01	0.113E-02
106.798	15.50	213.56	0.110E-02
98.291	16.00	213.26	0.107E-02

表2的说明:

YY = 年 (99为平均月垂直分布)

MM = 月 (1 = 1月, 2 = 2月……)

DD = 该月中的日子 (99为平均月垂直分布)

HH = 一天的钟点 (UTC)

NL = 垂直高度的数值 (对STD.DST, NL = 33)

压力 (hPa) = 大气总压力

Z (km) = 离地球表面的高度

温度 (K) = 空气温度

RH (%100) = 相对湿度 (以小数表示)

注1 — 若记录不到, 则可以将温度和压力的值置为零。

表3

DST_STD_LST.CSV站资料文件 – 记录结构实例

世界气象组织代码	站名	国家	纬度 (度)	经度 (度)	海拔高度 (m)
10 410	ESSEN	DL	51.4	6.967	153

注 – 纬度和经度的数值用十进制度表示 (即51.4 = 51° 24')。

附件 3

1 大气垂直分布的数值气候预测数据

用重新分析项目取得的ECMWF 15年数据集（ERA15）计算温度、压力和水蒸气密度的垂直剖面分布的月平均值，通常以一天的小时来平均。这一数据集包含从位于当地地球表面附近的参考高度到地表以上约30公里范围内的32个高度水平上00:00、06:00、12:00和18:00 UTC的空气总压力、空气温度和水蒸气密度的月平均垂直分布。数据为经度0°到360°、纬度+90°到-90°范围的数据，经度和纬度的分辨率均为都是1.5°。所有的数据以BIG-Endian格式，用IEEE浮点单精度标准（4字节，32比特）存储在文件中。

数据集以及用于获取数据的相关Matlab文件是本建议书不可分割的组成部分，并在补充文件R-REC-P.835-6-201712-I!!ZIP-E中提供。每一气象参数的月平均分布放在二进制文件<param>_<hh>.bin中，其中param是气象参数的名称（pres = 空气总压力（hPa），temp = 空气温度（K），vapd = 水蒸气密度（g/m³）），hh是一天中的钟点（即00，06，12和18（UTC））。分布水平的相关高度载于二进制文件hght.bin中。表4给出了7月12:00 UTC纬度 = 45° N、经度 = 9° E的分布示例。

表4
分布示例

Z (m)	压力 (hPa)	温度 (K)	Vapd (g/m ³)
665.488	939.255	298.373	9.823
698.823	935.673	298.125	9.617
816.585	923.092	296.598	9.302
1 026.379	900.957	294.292	8.811
1 309.298	871.693	291.459	8.099
1 650.689	837.298	288.287	6.992
2 039.463	799.373	285.107	5.706
2 467.391	759.191	282.116	4.555
2 928.467	717.723	279.045	3.641
3 418.375	675.691	275.934	2.692
3 934.342	633.633	272.913	1.855
4 474.659	591.936	269.707	1.286
5 038.169	550.876	266.183	0.911
5 624.303	510.656	262.354	0.636
6 232.944	471.427	258.213	0.428
6 864.291	433.307	253.687	0.277
7 518.708	396.390	248.780	0.173
8 196.752	360.767	243.521	0.103
8 898.985	326.527	237.971	0.058
9 626.211	293.764	232.319	0.034
10 380.050	262.580	226.984	0.019
11 164.590	233.064	222.845	0.009

表4 (完)

Z (m)	压力 (hPa)	温度 (K)	Vapd (g/m ³)
11 988.097	205.263	220.483	0.003
12 861.558	179.195	219.279	0.001
13 796.578	154.827	218.154	0.001
14 809.705	132.043	217.057	0.001
15 931.961	110.604	216.026	0.000
17 225.900	90.110	215.674	0.000
18 818.316	70.037	216.262	0.000
20 961.771	50.038	219.300	0.000
24 267.900	30.039	223.166	0.000
31 427.936	10.320	232.854	0.000

表4的说明:

Z (m) = 海拔高度

压力 (hPa) = 大气总压力

温度 (K) = 空气温度

Vapd (g/m³) = 水蒸气密度
